

小方坯连铸机自动控制系统的设计与试验研究

李东辉^{1,2} 刘相华¹ 王国栋¹

(1. 东北大学; 2. 沈阳理工大学)

摘 要 介绍了弧形小方坯连铸机自动控制系统的构成、主要控制功能的实现以及生产试验、计算机仿真试验的研究。此铸机的控制系统改造思路是在消化吸收意大利 DANIELI 公司为首钢设计的矩形坯连铸机控制系统的基础之上给出的, 为改造现有连铸机和设计现代化新铸机提供了依据。

关键词 连铸机; 自动控制; PLC 网络

中图分类号 TG249.7; TP29

文献标志码 A **文章编号** 1001-2249(2006)06-0358-05

试验铸机为弧形小方坯连铸机, 一机八流, 控制系统设备比较落后, 功能有限, 无扩展性, 在通讯接口方面存在一定的局限性, 不能完成高质量的自动化控制功能, 成品坯的表面质量和内部质量不理想, 无法保证工厂二级、三级自动化的顺利实施, 急需对其进行控制系统更新升级。改造后的铸机已实现了自动开浇和液面自动控制, 运转状态良好, 它不仅增加了铸坯产量, 提高了铸坯品质, 而且减轻了工人劳动强度。

1 铸机自动控制系统构成

原铸机控制系统采用 984 系统和 Freelance2000 系统, 984 系统用于逻辑控制, 包括结晶器振动、拉矫机、

辊道等; Freelance2000 系统用于冷却水控制和调节, 冷水调节为静态查表法, 拉速单回路。

图 1 为改造以后的这台连铸机的硬件组成图。该系统共由 10 台 Siemens S7-400 PLC 组成, 2 台公共系统 PLC, 其中 1 台为前部公用部分 PLC, 主要控制液压站(结晶器振动台的液压站、主液压站等)、大包、中间包的提升与横移、搅拌器调压泵、冷却水调压泵等; 另 1 台负责管理后部辊道, 每流有 1 台 PLC, 负责结晶器振动台以及管理从中间包、结晶器一直到切割辊道上的所有工艺设备。所有 S7-400 PLC 通过工业以太网与主控室 2 台 HMI 通讯, HMI 负责 1.5 级生产工艺数据管理, 每流 PLC 还通过 Profibus-DP 网与 ET-200 站、操作盘、

收稿日期: 2006-02-15

第一作者简介: 李东辉, 女, 1968 年出生, 讲师, 东北大学博士研究生, 沈阳理工大学材料科学与工程学院, 沈阳(110162), 电话: 024-82154022, E-mail: annie6821@163.com

较高的 Al_3Zr 和 Al_2O_3 颗粒微凸于基体表面, 直接与对磨面接触起承载作用, 减小了软基体与对磨面的有效接触面积, 增加了磨面贮油量, 从而使磨面能保持较厚和较完整的油膜, 减缓和阻止了两摩擦副间相对的接触和粘着, 有效地阻缓了磨面硬微凸体对其的犁削, 防止磨屑在表面间的聚集、长大; 另外, 润滑油从接触面把磨屑和热量带走, 防止摩擦面过热, 使摩擦过程持续稳定, 保持已形成表面膜的减磨作用; 同时, 由于颗粒的加入, 使 A359 合金基体被强化, 塑性变形受阻。因此, 复合材料在油润滑滑动摩擦过程中, 不易发生粘着磨损, 具有较好的减摩性和耐磨性, 复合材料均比基体和干滑动摩擦条件下明显耐磨。

3 结 论

(1) 原位熔体反应生成的 $(\text{Al}_3\text{Zr} + \text{Al}_2\text{O}_3)_p/\text{A359}$ 复合材料的耐磨性显著高于基体 A359 合金的耐磨性。

(2) 随着颗粒体积分数的增加 $(\text{Al}_3\text{Zr} + \text{Al}_2\text{O}_3)_p/\text{A359}$ 复合材料耐磨性有所提高, 尤其在高载荷时颗粒的减磨作用更加突出。

(3) 在油润滑的条件下, 由磨损表面 SEM 可知, 复

合材料材料比基体耐磨, 且 A359 合金磨损特征为磨粒磨损和粘着磨损的混合型磨损, $(\text{Al}_3\text{Zr} + \text{Al}_2\text{O}_3)_p/\text{A359}$ 复合材料磨损形式以磨粒磨损为主。

参 考 文 献

- 1 Tjong S C, Ma Z Y. Microstructure and Mechanical Characteristics of in Situ Metal Matrix Composites. *Metals and Engineering*, 2000, 49(4): 113 ~ 115
- 2 吴进明, 郑志烈, 李志章. 颗粒增强铝基原位复合材料. *材料导报*, 1999, 13(5): 52 ~ 54
- 3 张树瑜, 柴跃生. 原位 TiB_2/Al 复合材料形核机制. *特种铸造及有色合金*, 2002(4): 6 ~ 8
- 4 赵德刚, 刘相法, 边秀房, 等. TiB_2/Al 复合材料微观组织和力学性能研究. *特种铸造及有色合金*, 2005, 25(1): 32 ~ 34
- 5 王金国, 周宏, 大成桂作, 等. Ni-Mn 对 Al-Si-Cu-Mg 系合金磨损失效机制的影响. *特种铸造及有色合金*, 2001(1): 1 ~ 3
- 6 吴洁君, 王殿斌, 桂满昌, 等. 颗粒增强铝基复合材料干滑动摩擦性能述评. *稀有金属*, 1999, 23(3): 214 ~ 219
- 7 Alpas A T, Embury J D, Ludema K C, et al. *Wear of Materials*. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1991.
- 8 江润莲, 赵玉涛, 戴起勋, 等. A359-Zr(CO_3)₂ 体系反应合成复合材料的干滑动磨损性能研究. *中国有色金属学报*, 2004, 14(9): 1 621 ~ 1 625
- 9 江润莲, 赵玉涛, 戴起勋, 等. A359-Zr(CO_3)₂ 体系反应合成复合材料的干滑动磨损性能研究. *中国有色金属学报*, 2004, 9(14): 1 621 ~ 1 625

(编辑: 刘 卫)

图1 铸机自动控制系统构成图

变频器等通讯以交换控制信息。

控制系统 I/O 点数:

前部公用部分

DI: 192 点 DO: 128 点

AI: 40 点 AO: 16 点

单流控制部分

DI: 320 点 DO: 216 点

AI: 56 点 AO: 24 点

工业以太网是工业局域网,监控工作站、工程师工作站,各台 PLC 均与该线连接,实现站间通讯。Profibus-DP 为设备网络,承担 PLC 与现场远程 I/O 之间的通讯。同时,采用了远程 I/O 智能终端站 ET-200,分散设置在各操作室和现场控制盘内,它可以通过通讯端口直接挂在 Profibus-DP 总线下,这样使外部电缆减少,具有传送距离远、可靠性好、控制功能强和编程容易的特点。

2 系统软件配置

中央处理器采用 STEP7 语言来编制程序,用来控制多个过程的信号处理,并为不同任务提供不同类型的模块,常用的有组织块 (OB),功能块 (FC)、数据块 (DB) 等,主控程序为一个 (OB) 块,OB 块调用 FC 块,实现设备的某一功能。本系统主控模块 (OB1) 主要包括 10 个功能块。

①公共部分主控制程序。②结晶器液位控制:①结晶器液位控制主程序;②塞棒自动开浇主程序;③塞棒抖动控制程序;④结晶器液位显示模块。③结晶器电磁搅拌主程序。④二次冷却模块:①二次冷却主程序;②二冷区温度滤波;③足辊段和冷却 1、2、3 段主程序;④二冷成长模型模块。⑤引锭杆控制模块:①柔性引锭杆主程序;②脱锭程序。⑥拉坯辊控制模块:①拉坯辊主

程序;②1 号拉坯辊动作和压力调节;③2 号拉坯辊动作和压力调节;④拉坯电机主程序。⑦辊台控制主程序。⑧辊台上铸坯跟踪程序。⑨定长切割模块:①定长切割主程序;②切割优化主程序;③切割报告主程序;④切割优化事件程序;⑤切炬主程序。⑩物料跟踪管理模块:①物料跟踪码盘计数器的数据读取程序;②物料跟踪管理程序;③物料跟踪数据写入程序。

本系统采用梯形图编程,根据系统在线控制功能,顺序地对钢包回转台、中间罐引车装置、结晶器振动及液位控制等装置、二次冷却装置、拉矫机、剪机等在线状态进行检测、执行数据的存取、传送、组合和比较等动作,完成应用程序的逻辑和算术运算任务,根据运行结果,产生相应的输出信号,实现输出控制、显示和报警等功能。

另外,具有功能齐全的上位监控画面,如主体操作监控画面、二次冷却水监控画面、大包监控画面、后部辊道监控画面,实现了上位机操作、数据监控、设备控制、报警监视、历史趋势等功能。

3 主要控制功能的实现

3.1 自动开浇与液位控制

当钢水进入中间包并达到设定点以后,自动开浇模仿人工开浇过程,设定开浇参数,即塞棒运动模型,包括运动分几步、每步的位置及停留时间以及一步到另一步的速度;拉矫机拉速从零到正常速度的变化模型;确定 PID 调节常数 (K_p 、 T_i 、 T_d) 等。生产中不一定这些步骤全部需要,当液位到达机器开浇需要的液位时,马上跳至最后一步。程序设计首先给定塞棒零位置,编码器在不同时刻返回不同的位置值,计算塞棒的实际开启距离,从而获得浇口流量值,图 2 为自动开浇塞棒运动图。

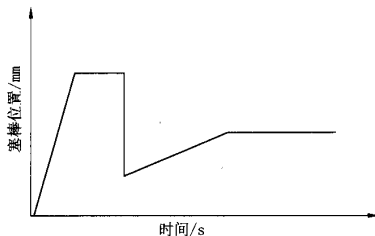


图2 自动开浇塞棒运动图

开浇完成后,塞棒的功能转为液位的自动调节。塞棒控制中间包水口开度,调节钢水从中间包流入结晶器的流量,以维持钢水液面的稳定,塞棒位置信号来源于结晶器液位监视器 (Co-60 射线检测仪),监视器通过液位测量系统准确测量结晶器钢水液位高度,该信号提供给塞棒控制器,由控制器再把信号提供给伺服电机,伺服电机作用于塞棒执行机构,从而控制钢水流量,维持

液面稳定。

结晶器液位控制系统的核心就是 PID 控制器模块, 本系统采用两级 PID 控制方法: 第一级为液位检测 PID; 第二级为塞棒位置检测 PID。液位检测的 PID 控制器输入量为控制误差 $e = y_{\text{ref}} - y_f$, 其中 y_{ref} 是结晶器的液位设定点, y_f 为实际检测的结晶器液位, 其输出值是塞棒位置 S , 它也是第二级 PID 控制器模块的塞棒位置设置点 S_{ref} , 它与检测到的塞棒的实际位置 S_f 之差 ($b = S_{\text{ref}} - S_f$) 作为第二级控制模块的输入量, 其输出值为塞棒执行机构的电信号。同时系统还会根据拉坯速度的变化调整结晶器液位高度, 图 3 为液位控制原理图, 它是液位-塞棒-拉速结合在一起的 control 方法^[2]。

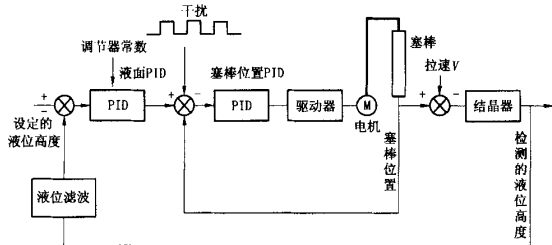


图3 液位控制原理图

3.2 二次冷却水系统控制

二次冷却是铸坯出结晶器以后的扇形段处的冷却, 本铸机分为 4 个冷却段: 足辊段、冷却段 1、冷却段 2、冷却段 3。对于不同的钢种, 各个冷却段的水流量的确定是关键问题, 它有利于稳定铸坯表面温度, 减少二次冷却区铸坯质量缺陷。原方坯连铸机二次冷却水量的调节为静态查表法, 拉速单回路, 没有通过局域网与上位机相连。基于设备的现状, 改造后的铸机采用参数控制和温度反馈控制实现二次冷却自动配水。

程序将“速度-水量”曲线存储在铸机计算机里, 它可以获得某一速度下所需的冷却水量, 来控制阀门的开启。不同的钢种具有不同的配水曲线, 这种关系是通过离线计算得出铸坯配水表, 加以回归后获得“速度-水量”曲线。实际浇注过程中, 由于各种原因导致中间包钢水温度波动, 程序设计考虑了过热度的影响, 以标准中包温度下“速度-水量”曲线为基础, 加进过热度对各冷却段的修正系数, 即: $Q = (Av^2 + Bv + C) \cdot (1 + \alpha\Delta T_1)$, 式中 A 、 B 、 C 为回归以后多项式的 3 个系数, 根据铸坯的钢种和规格来确定; v 是拉坯速度, ΔT_1 为实际中包温度和标准中包温度的差值。二次冷却系统的温度反馈控制回路采用常规 PI 控制器, 即: $Q' = K_p \cdot \Delta T_2 + K_i \cdot \Delta T_2$, 式中 K_p 、 K_i 分别是比例和积分控制增益; ΔT_2 是二次冷却室出口铸坯温度设定值与经过滤波的铸坯表面温度的测量值之差; Q' 为对流量的反馈修正值。对拉坯速度 v 和铸坯实际温度的准确测定, 对控制过程是

十分重要的。

成长模型是一种更加精确的控制方法, 因为浇注过程是一个动态的过程, 当拉速变化时, 如果单纯的按瞬时速度来确定水量有时会出现过度冷却或冷却不足的现象, 所以本系统采用加权平均速度来替换瞬时速度的方法解决这个问题^[1], 即: $V = (1 - k)v_1 + kv_2$, 式中 k 是系数, 决定两种速度所占的权重, v_1 是平均速度, 来自铸坯成长模型, v_2 是铸坯的瞬时拉速, 来自变频器的模拟量输出。由于温度检测信号中有大量的干扰, 因而要对实测温度进行滤波, 图 4 为控制系统原理框图。

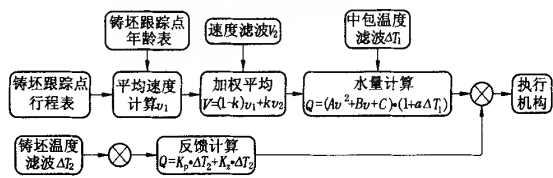


图4 控制系统原理框图

3.3 引锭杆跟踪控制

引锭头进入拉辊, 拉辊压下, 拉矫机启动后, 装在拉矫机电机上的脉冲信号发生器开始产生脉冲, 并将脉冲信号传给各流 PLC 计数模板, 并折算成长度, 直至将引锭杆送至结晶器下口 200 mm 左右处, 点动拉矫机正、反转将引锭头送入结晶器下口 150 ~ 200 mm 处停止, 完成送引锭。为确保在脉冲发生器发生故障的情况下, 仍然能够对引锭杆进行很好的控制, 提高控制的可靠性, 在采用脉冲发生器与计数模板控制的同时, 应用速度积分方法对引锭杆进行跟踪控制, 即按照公式

$$L = \int v dt$$

的离散形式 $L = L_i + v\Delta t$ 得到引锭杆运行长度。式中, L 为引锭杆运行的长度; L_i 为上一次引锭杆的运行长度; v 为拉矫机的实际速度; Δt 为 PLC 的采样时间间隔。

4 试验研究

4.1 全自动浇钢生产试验

铸机控制系统的改造以自动开浇和液位控制为突破口, 进而实现整个铸机的全自动化改造。试验在首钢小方坯连铸机八流中的一流上进行, 浇注断面为 120 mm × 120 mm, 中间包自动开浇质量为 9.5 t, 钢种为各种碳钢、低合金钢, 试验共进行了 30 个浇次, 力求获得合理的开浇参数和液面调节参数。试验中钢水流量的理论计算采用的是 VSV 通量表。实践证明, 这与实际使用的塞棒有些差距。后观察操作工手动开浇过程, 适当放大开浇的塞棒位置, 获得了比较合理的开浇参数。另经多次优化液位调节参数后, 调节品质得到很大提高。图 5 为某次试验的自动浇钢曲线, 中包温度为

1 497 ℃,钢种为 82B,起步拉速为 2.2 m/min。由图 5 可见,自动开浇成功后,液位能很快达到给定值并保持稳定,波动不明显。特别要指出的是,试验采用的小方坯连铸结晶器尺寸较小,液面比较容易受到扰动的影响^[2]。试验成功后投入试生产,又对 20 个中包浇次的钢水进行测试,结果表明,正常稳定的工作状态下(不包括开浇、改变拉速和引锭杆未脱出时的控制)液面控制精度为 ±5 mm,达到设计要求。

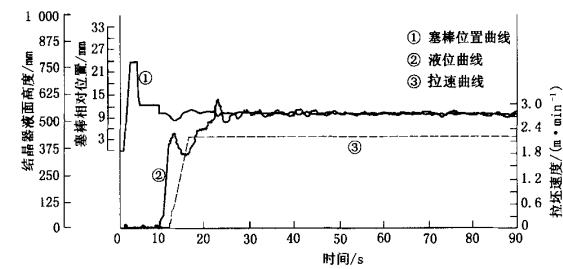


图 5 自动浇钢曲线

4.2 二次冷却配水的计算机仿真试验

傅里叶导热微分方程常用来预测方坯的温度场^[3],忽略轴向导热,输入给定的初始条件和边界条件后,可以获得不同冷却条件下铸坯表面温度变化值,程序采用有限差分的数值计算方法,考虑了结晶器冷却时角部气隙的影响、凝固潜热的影响、液芯对流换热的导热等效、不同温度下热物性参数变化等因素^[4]。通过数学回归获得不同钢种、不同规格的铸坯在不同冷却段的二次冷却曲线。模拟铸机为上述小方坯连铸机,钢种 40Cr,实际中包温度为 1 510 ℃,标准中包温度为 1 520 ℃,正常拉速为 2.4 m/min。仿真试验包括以下内容:

(1) 浇钢温度出现波动时,仅拉速调节水量(方法 1)和拉速、过热度调节水量(方法 2)的铸坯温度比较,见表 1。

表 1 方法 1 和方法 2 铸坯表面温度比较表

	目标温度/ ℃	方法 1 计算 的铸坯温度/℃	方法 2 计算 的铸坯温度/℃
足辊段末端	1 140	1 145	1 144
冷却段 1 末端	1 080	1 084	1 083
冷却段 2 末端	1 030	1 035	1 034
冷却段 3 末端	1 000	998	1 001

可以看出,以二次冷却模型计算获得的各段喷水量为基础,再重新计算铸坯表面温度后,其值与目标温度的差值为 ±5 ℃,可以认为模型准确;还可以看出过热度对铸坯表面温度的变化影响不明显。

(2) 假设足辊段喷嘴故障,出现堵塞致使喷出水量减少 20 L/min,如果未采用温度反馈控制法(方法 3),二次冷却段出口温度比目标温度要高,方法 3 能对水量进行重新修正,它将补偿的水量按比例分配给各冷却

段^[5](故障段除外),即把故障段缺失的水量由后续冷却段来补偿,表 2 列出了未进行水量修正(方法 1)和采用方法 3 进行水量修正以后的铸坯表面温度计算值的比较。

表 2 方法 1 和方法 3 的铸坯表面温度比较表

	目标温度/ ℃	未进行水量修正 的铸坯温度/℃	采用方法 3 进行水量 修正后的铸坯温度/℃
足辊段末端	1 140	1 168	1 168
冷却段 1 末端	1 080	1 102	1 092
冷却段 2 末端	1 030	1 043	1 033
冷却段 3 末端	1 000	1 009	996

具体采用何种控制方法,可根据实际运行情况决定。当浇注条件稳定时,采用方法 1 就可获得稳定的铸坯温度分布;当浇注条件明显波动时,加进钢水过热度的影响,采用方法 2 的控制模型;在某段的喷嘴出现堵塞,或者操作不当,使水量高于(或低于)目标水量,采用方法 3 可以更准确地进行二次冷却水的动态调节,但是温度反馈控制对流量的修正是有限的,修正后的总流量不得低于前馈流量的 30%,这主要是从安全角度考虑的。

为了验证离线模型的准确性,进行了生产现场的数据采集和铸坯表面温度测试。试验结果表明,铸坯表面温度的测量值与计算值偏差在 20 ℃ 以下,在误差允许范围之内,证明模型真实可信。仿真试验表明,采用温度反馈法调节以后,温度波动现象减小,所以该二次冷却水在线控制方法有利于稳定铸坯表面温度,减少二次冷却区质量缺陷。意大利 DANIELI 公司为首钢设计的矩形坯连铸机二次冷却水控制系统基本采用这种方法,目前该铸机运行平稳,具有灵活、可靠、准确的特点,只是在运行过程中,未充分发挥温度滤波、成长模型模块的作用,也未将过热度的变化考虑进去,所以本铸机二次冷却控制系统的改造是在消化吸收的基础之上,并结合该铸机的特点制定出以上控制方法的。

5 结 论

(1) 本方坯连铸机自动控制系统的设计思想是本着过程回路控制、电气设备顺序控制、上位机监控管理组成一个完整的计算机系统,构成“三电”一体化,它是由 PLC 构成的集中管理、分散控制全流程生产线的计算机自动控制系统。

(2) 改造后的塞棒自动控制系统可以准确、快速地实现自动开浇和钢水的液面调节,其液位波动范围在 ±5 mm 之内,满足了工艺要求,开浇成功率高,可以实现连铸的全自动浇钢。

(3) 提出的二冷水在线控制方法具有良好的控制效果,控制模型准确,它的应用将有利于稳定铸坯表面温度,减少二冷区质量缺陷。

高熔点合金半固态熔体的感应炉保温制备

张励忠 李海开 胡远猛 韩淑霞 肖黎明

(北京交通大学)

摘要 研究了中频感应炉在近液相线保温制备低合金钢半固态熔体的方法。通过研究不同保温条件下的水淬组织和空冷组织,掌握了保温温度、保温时间及加热方式对组织的影响规律。在大过冷度和大过热温度下,熔体内不易形成晶坯(准固相原子团簇)和游离晶,水淬组织粗大,而在近液相线温度(1 508 ℃)下,熔体内易形成大量晶坯并演化为游离晶均匀分布于熔体内,它们能在凝固时显著细化、匀化晶粒,使水淬组织细小、均匀,即使在空冷条件下,这种细化机制也起作用。由于中频感应炉的电磁搅拌作用,在近液相线温度短时保温就可孕育出相当数目的游离晶,并能在随后的保温过程中保持游离晶的形态和数目,保温时间为5~50 min的水淬组织没有显著变化。

关键词 半固态;近液相线;低合金钢;组织

中图分类号 TG249.2

文献标志码 A

文章编号 1001-2249(2006)06-0362-04

高熔点金属半固态成型的一个关键问题就是半固态熔体的制备。长期以来,电磁搅拌法制备半固态熔体在实际金属半固态成型应用中占据主导地位,但其工艺复杂、设备投资大、效率低、成本高。而近液相线保温法是一种简单可行、成本低廉的方法。铝合金在液相线附近保温30 min后进行铸造才可获得理想的半固态坯料^[1~5]。该方法的突出缺点是保温时间长,生产效率低。

笔者首次将近液相线保温法应用于铸钢的半固态熔体制备,研究了在中频感应炉内不同保温温度 and 不同保温时间下的ZG25MnCrNiMo低合金钢熔体的水淬组织与空冷组织。结果表明,该方法简单可行,在近液相线保温的效果显著。但保温时间的影响规律不同,短时(5 min)保温即可获得较好效果,从而生产效率低的问题得以解决。

1 试验过程

试验材料为ZG25MnCrNiMo,是目前机车车辆用低合金铸钢的主型钢种。该材料经正火+回火和淬火+回火热处理可分别达到美国AAR铸钢标准中C级钢和E级钢力学性能指标。其化学成分见表1。由差热分析(DTA)确定该材料的液相线温度为1 510 ℃。

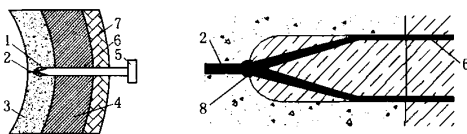
试验用碱性中频感应炉不氧化法熔炼炉料。用裸头铂铑30-铂铑6热电偶直接连续测温^[6],热平衡误差为0.36 ℃,温度响应时间小于0.1 s,测温原理见图1。

自行研制的控温柜可以按预设参数控制加热、冷却和保温,控温精度为 ± 1 ℃。取样用石英管吸样器抽取。

表1 ZG25MnCrNiMo的化学成分

%

W _B										
C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Mo	Ni	Fe	
0.22~0.28	0.20~0.40	1.20~1.50	≤0.04	≤0.40	≤0.30	0.40~0.60	0.20~0.30	0.35~0.55	余量	



(a) 热电偶安装局部俯视图

(b) 测温节点放大图

图1 测温示意图

1. 测温孔 2. 测温端传热段 3. 坩埚 4. 填充料 5. 温度显示仪表
6. 热电偶丝 7. 感应线圈 8. 热电偶测温节点

ZG25MnCrNiMo熔炼好后,将其依次冷却至1 495、1 508、1 520、1 535 ℃分别保温,改变保温温度时,为消除上次保温产生的效果,均先把钢液加热至1 600 ℃之后再冷却至下一保温温度。在保温过程中的1、5、15、30、50 min依次取两个试样,一个水淬,另一个空冷。另外,在普通铸造浇注温度下1 580 ℃保温30 min后,也取样水淬和空冷。

所有试样经粗磨、精磨、抛光后,用体积分数为2%的硝酸酒精溶液浸蚀,在JXJ-III型光学显微镜上观察,并拍摄金相照片。

收稿日期:2006-02-23

基金项目:北方交通大学“十五”科研计划重大项目(230-12)

第一作者简介:张励忠,男,1961年出生,博士,副教授,北京交通大学机械与电子控制工程学院,北京(100044),电话:010-51682036, E-mail: zlz@jdxj. njtu. edu. cn

参 考 文 献

- 1 张振山,柴天佑. 抚钢合金钢方坯连铸机二次冷却控制. 控制理论与应用,1999(6):10~12
- 2 郭义,乔俊飞,王伟. 连铸过程的一种串级控制方法. 中国有色金属学报,1999,9(1):201~206

- 3 陈青海. 铸件凝固过程数值模拟. 重庆:重庆大学出版社,1991.
- 4 李东辉,白金兰,邱以清,等. 基于热传输理论的方坯连铸二冷水在线控制方法的研究. 特种铸造及有色合金,2005,25(2):92~95
- 5 刘青. 矩形坯连铸机二次冷却的在线控制. 冶金自动化,1997(2):8~11

(编辑:张正贺)